

Artículo

Evaluación técnico-económica y diseño conceptual de un proceso de producción de 2,3-butanediol a partir de bagazo de caña de azúcar en Cuba

Techno-economic evaluation and conceptual design of a 2,3-butanediol production process from sugarcane bagasse in Cuba

Lizthalia Jiménez-Guerra ¹, Amaury Pérez-Sánchez ^{2,*} y Diana Deisy Alcalá-Galiano-Morell ³

¹ Facultad de Ciencias Aplicadas, Universidad de Camagüey, Cuba, Camagüey; <https://orcid.org/0009-0004-4537-2366>, lizthalia.jimenez@reduc.edu.cu

² Facultad de Ciencias Aplicadas, Universidad de Camagüey, Cuba, Camagüey; <https://orcid.org/0000-0002-0819-6760>

³ Facultad de Ciencias Aplicadas, Universidad de Camagüey, Cuba, Camagüey; <https://orcid.org/0000-0002-3081-8837>, diana.galiano@reduc.edu.cu

* Correspondencia: amaury.perez84@gmail.com

Cita: Jiménez-Guerra, L., Pérez-Sánchez, A., & Alcalá-Galiano-Morell, D. D. (2026). Evaluación técnico-económica y diseño conceptual de un proceso de producción de 2,3-butanediol a partir de bagazo de caña de azúcar en Cuba. *Multidisciplinary Collaborative Journal*, 4(1), 144-165. <https://doi.org/10.70881/mcj/v4/n1/116>

Recibido: 15/07/2025

Revisado: 10/01/2026

Aceptado: 19/01/2026

Publicado: 22/01/2026



Copyright: © 2026 por los autores. Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la [Licencia Creative Commons, Atribución-NoComercial 4.0 Internacional. \(CC BY-NC\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

 <https://doi.org/10.70881/mcj/v4/n1/116>

Resumen: El 2,3-butanediol (2,3-BDO) tiene un gran potencial para diversas industrias, incluyendo la química, cosmética, agrícola y farmacéutica. El presente trabajo tiene como objetivo realizar la evaluación técnico-económica preliminar y diseño conceptual de una planta de producción de 2,3-BDO a partir de bagazo de caña de azúcar por la ruta fermentativa mediante el empleo del simulador SuperPro Designer®, con el fin de determinar los indicadores productivos y de rentabilidad más importantes bajo las condiciones económicas actuales de Cuba. La planta procesará 400 toneladas métricas (TM) de bagazo por año y producirá anualmente 40 TM de 2,3-BDO. Se necesitan USD \$ 26,589 millones para erigir la planta de producción propuesta, con un costo de operación anual de USD \$ 1,483 millones y unas ganancias netas anuales de USD \$ 5,520 millones. Se obtendrá un valor actual neto, tasa interna de retorno y periodo de recuperación de la inversión de 14,067 millones, 18,56% y 4,82 años, siempre y cuando el precio de venta del 2,3-BDO sea de USD \$ 220/kg. El estudio de sensibilidad realizado indica que, para un precio unitario de venta de 2,3-BDO menor de USD \$ 150/kg, la propuesta tecnológica comienza a ser no rentable. El proyecto de planta simulado en este estudio se clasifica como no competitivo debido a que el precio de venta del 2,3-BDO fijado para obtener indicadores económicos rentables y factibles es muy superior al rango establecido internacionalmente y en otros estudios para este indicador.

Palabras clave: 2,3-butanediol; bagazo de caña de azúcar; evaluación técnico-económica; valor actual neto; análisis de sensibilidad.

Abstract: 2,3-Butanediol (2,3-BDO) has great potential for various industries, including chemicals, cosmetics, agriculture, and pharmaceuticals. This work aims to perform the preliminary techno-economic evaluation and conceptual design of a 2,3-BDO production plant from sugarcane bagasse by the fermentation route using SuperPro Designer® simulator, in order to calculate the most important productive and profitability indicators under the current economic conditions in Cuba. The plant will process 400 metric tons (MT) of

bagasse per year and will produce 40 MT of 2,3-BDO annually. USD \$ 26.589 million are required to erect the proposed production plant, with an annual operating cost of USD \$ 1.483 million and annual net profits of USD \$ 5.520 million. A net present value, internal rate of return, and payback period of USD \$ 14.067 million, 18.56%, and 4.82 years will be obtained, provided the unit selling price of 2,3-BDO is USD \$ 220/kg. The sensitivity study conducted indicates that the technological proposal becomes unprofitable for a unit selling price of 2,3-BDO below USD \$150/kg. The plant project simulated in this study is classified as uncompetitive because the 2,3-BDO unit selling price set to obtain profitable and feasible economic indicators is well higher than the range established internationally and in other studies for this indicator.

Keywords: 2,3-butanediol; sugarcane bagasse; techno-economic evaluation; net present value; sensitivity analysis.

1. Introducción

El 2,3-butanediol (2,3-BDO) o 2,3-butilénlicol es un isómero del butanediol el cual se emplea para la fabricación de tintes de impresión, perfumes, fumigantes, agentes humectantes y suavizantes, explosivos, plastificantes, alimentos y compuestos farmacéuticos. Además, el 2,3-BDO puede ser deshidratado hacia metil-etil-cetona, un solvente orgánico excelente para resinas y lacas, y en butadieno para la manufactura de caucho sintético. Además, el 2,3-BDO puede ser deshidrogenado para obtener acetoina y diacetilo los cuales son agentes saborizantes usados en productos lácteos, margarinas y cosméticos (Rosales-Calderon & Arantes, 2019). Es un líquido incoloro e inodoro que tiene un elevado punto de ebullición (180-184 °C) y un bajo punto de congelación. Su valor calórico (27 198 J/g) lo convierte en un valioso aditivo de combustible comparable favorablemente con otros aditivos líquidos tales como metanol y etanol (Garg & Jain, 1995).

El 2,3-BDO puede ser producido mediante la hidrogenación catalítica de sacáridos con hidrógeno a elevadas presiones y temperaturas. Aunque los métodos de síntesis química están disponibles para la producción de 2,3-BDO y sus derivados (Cho et al., 2015), la producción de 2,3-BDO por la ruta microbiana ha atraído la atención en los últimos años como una tecnología prometedora para lograr una economía de baja huella de carbono y una industria medioambientalmente amigable (Rosales-Calderon & Arantes, 2019), llevando a cabo esfuerzos y progresos considerables en el desarrollo de la producción de 2,3-BDO a partir de biomasa y otros residuos lignocelulósicos debido a la reducción de los combustibles fósiles y a la creciente preocupación por el calentamiento global (Cho et al., 2015). Comparado con la producción de etanol y butanol, la producción de 2,3-BDO puede alcanzar elevadas concentraciones (hasta 152 g/L) y productividades volumétricas (hasta 4,2 g/L) debido a los bajos efectos inhibitorios del producto en las cepas productoras de 2,3-BDO. Debido a esto, la elevada eficiencia de fermentación de 2,3-BDO sugiere la factibilidad de su implementación industrial (Zang et al., 2020).

Debido a los precios volátiles y cambiantes de los azúcares de almidón, la investigación en la producción microbiana de 2,3-BDO ha explorado materias primas alternativas tales como melaza de caña de azúcar (Afschar et al., 1991) (Wang et al., 2021) (Stoklosa et al., 2022); gases residuales industriales que contienen monóxido de carbono o gas de síntesis como única fuente de carbono y energía (Köpke et al., 2011); hidrolizados de yuca (Lee & Seo, 2019); hidrolizados ricos en arabinosa a partir de pellets de pulpa de azúcar de remolacha (Narisetty et al., 2022); suero de queso (Roncal et al., 2023) y

racimos vacíos de la fruta de la palma aceitera (Rehman et al., 2021). Otros estudios realizados relacionados con el empleo de sustratos producir 2,3-BDO por la ruta fermentativa reportan el empleo de acetato bajo condiciones aerobias y de glucosa bajo condiciones de oxígeno limitante en un proceso de fermentación de dos etapas (Radoš et al., 2015), glucosa mediante fermentaciones fed-batch (Lee & Seo, 2019); xilosa derivada de bagazo de caña de azúcar (Amraoui et al., 2021) (Narisetty et al., 2021); sacarosa (Wang et al., 2021) (Suttikul et al., 2023); y arabinosa (Narisetty et al., 2022).

Entre los múltiples microorganismos que han sido estudiados para producir y acumular 2,3-BDO se encuentran *Klebsiella pneumoniae* (Garg & Jain, 1995) (Pahlavanzadeh et al., 2009); *Bacillus polymyxa* (Garg & Jain, 1995); *Clostridium autoethanogenum*, *C. ljungdahlii*, y *C. ragsdalei* (Köpke et al., 2011); *Corynebacterium glutamicum* (Radoš et al., 2015); *Klebsiella oxytoca* M1 (Cho et al., 2015); *Saccharomyces cerevisiae* poliploide (Lee & Seo, 2019); *Enterobacter ludwigii* (Amraoui et al., 2021) (Narisetty et al., 2021) (Narisetty et al., 2022); *Bacillus subtilis* CS13 (Wang et al., 2021); *Enterobacter cloacae* SG1 (Hazeena et al., 2022); *Bacillus subtilis* GD2, *Bacillus subtilis* GD5, *Bacillus licheniformis* FSBC 320, *Serratia plymuthica* FSBC 401, y *Lactococcus lactis* FSBC 64 (Suttikul et al., 2023); *Lactococcus lactis* (Roncal et al., 2023); *Paenibacillus polymyxa* DSM 365 (Okonkwo et al., 2023); *Paenibacillus polymyxa* (Stoklosa et al., 2022) y *Klebsiella pneumoniae* PM2 (Rehman et al., 2021).

Según (Tinôco et al., 2020), las mejores concentraciones de 2,3-BDO se han alcanzado usando cepas metabólicamente modificadas tales como *S. cerevisiae* (178 g/L), *E. cloacae* (152 g/L), and *K. oxytoca* (130 g/L), and cepas salvajes altamente productivas tales como *K. pneumonia* (150 g/L), and *P. polymyxa* (111 g/L). A pesar de estas altas productividades, la implementación a gran escala de estos bioprocesos no se ha consolidado aún, siendo los principales factores limitantes para efectuar el escalado de la producción fermentativa de 2,3-BDO la seguridad, pureza del isómero, costos de las materias primas y los procesos de recobrado y purificación. El número limitado de compañías que llevan a cabo la producción industrial de 2,3-BDO por la ruta microbiana en la etapa actual y el dominio de centros de investigación a largo plazo demuestran que esta biotecnología aún está concentrada en la escala de laboratorio, dependiendo de estudios relacionados con el sustrato, microorganismos, métodos de fermentación eficiente y las etapas de purificación, para que se conviertan en económicamente viables a escala industrial (Tinôco et al., 2020).

Son varios los estudios reportados donde se ha evaluado, desde el punto de vista técnico-económico, la factibilidad de producir 2,3-BDO a partir de recursos renovables mediante la aplicación de bioprocesos. En este sentido, y en un estudio pionero, Koutinas et al. (2016) presentaron la evaluación técnico-económica de la producción de 2,3-BDO mediante fermentación empleando glicerol, sacarosa y melaza de caña de azúcar como fuentes de carbono, en donde se consultaron datos experimentales reportados en la literatura científica para diseñar la etapa de fermentación. También Zang et al. (2020) analizaron la factibilidad técnico-económica de un proceso de conversión de biomasa mediante el pretratamiento de solvente eutéctico profundo de alta carga de sólidos para la coproducción de 2,3-BDO, furfural y lignina técnica, utilizando para ello el simulador Aspen Plus. Del mismo modo, Narisetty et al. (2021) llevaron a cabo un análisis técnico-económico para evaluar la factibilidad del esquema de destilación asistido por la extracción de dos fases acuosa para su posible comercialización, en donde el 2,3-BDO se produjo mediante una cepa mutante de *Enterobacter ludwigii* consumiendo hidrolizado de bagazo de caña de azúcar rico en xilosa. Asimismo, Mailaram et al. (2022) efectuaron un estudio de factibilidad técnico-económica mediante el simulador Aspen Plus para la producción microbiana de 2,3-BDO a partir de azúcares C₅ y C₆ derivados del afrecho cervecero, aplicando para ello la tecnología *pinch*. En Tiwari et al. (2023) se realizó una evaluación del ciclo de vida

para la producción de 2,3-BDO a partir de la fermentación de afrecho cervecero mediante el empleo del simulador Aspen Plus integrado con la tecnología *pinch*, con el fin de identificar los impactos medioambientales asociados. En Gadkari et al. (2023) se efectuó un análisis técnico-económico y de rentabilidad para la producción fermentativa de 2,3-BDO utilizando bagazo de caña de azúcar y mediante el empleo del simulador SuperPro Designer®. En Ebrahimian & Mohammadi, 2024 se procedió a realizar un análisis técnico-económico relacionado con la producción de 2,3-BDO a partir de la hidrólisis enzimática y fermentación de residuos de madera, empleando para ello el simulador SuperPro Designer®. Finalmente, Sikazwe et al. (2024) emplearon el simulador Aspen Plus para simular múltiples escenarios para la producción de 2,3-BDO a partir de melaza A de caña de azúcar en una biorefinería anexa a una fábrica de azúcar para luego realizar el análisis técnico-económico correspondiente.

En la actualidad existen planes tangibles y concretos de producir 2,3-BDO a partir de bagazo de caña de azúcar (BCA) en Cuba por la ruta fermentativa. Sin embargo, no se conoce que rentabilidad económica tendrá una planta de este tipo bajo las condiciones económicas actuales de Cuba. En este contexto, el presente estudio se llevó a cabo la evaluación de la factibilidad técnico-económica preliminar y el diseño conceptual de un proceso de producción de 2,3-BDO a partir de BCA por la ruta fermentativa, con el objetivo de valorizar este residuo de la industria azucarera cubana y como etapa determinante para investigar críticamente si este proceso puede conducir a la producción económica de 2,3-BDO, así como también para determinar la rentabilidad del proceso de producción propuesto.

2. Materiales y Métodos

2.1. Descripción del proceso de producción de 2,3-BDO a partir de BCA por la ruta fermentativa

El proceso de producción que se describe a continuación fue establecido de acuerdo con lo reportado por Gadkari et al. 2023, incluyendo el equipamiento implementado, parámetros operacionales y orden tecnológico. Este proceso productivo comienza con la llegada de la materia prima, en este caso el bagazo de caña de azúcar húmedo, cuya composición química porcentual aplicada en la simulación se muestra en la Tabla 1, según lo reportado por Sánchez et al. 2024.

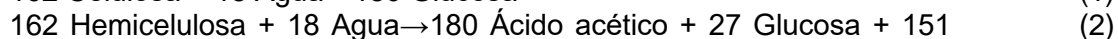
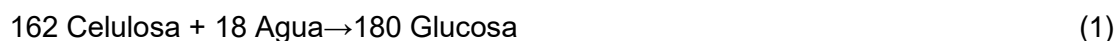
Tabla 1.

Composición química porcentual del bagazo de caña de azúcar (base seca)

Componente	Valor (% m/m)
Ceniza	3,4
Celulosa	48,5
Hemicelulosa	21
Lignina	18
Proteínas	2,78
Solubles	6,32

Este bagazo es alimentado al molino triturador con un flujo de 5 TM/lote. El objetivo de este paso es triturar el bagazo hasta un determinado tamaño de partícula.

Posteriormente este bagazo molido pasa a un reactor cilíndrico vertical provisto de agitación al cual se le introduce directamente vapor de agua saturado a 130 °C y 2,7 bar y ácido sulfúrico al 5 % (Gadkari et al., 2023) para que ocurra la hidrólisis ácida con explosión de vapor. Una vez en el reactor, la hemicelulosa y la celulosa se desdoblan en xilosa y glucosa a través de las reacciones que se muestran a continuación (Sánchez et al., 2024).



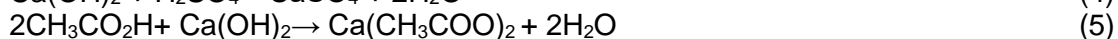
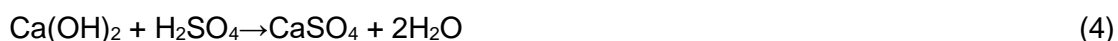
Xilosa



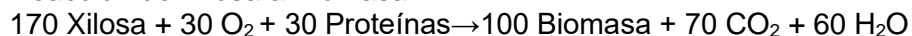
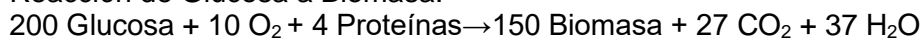
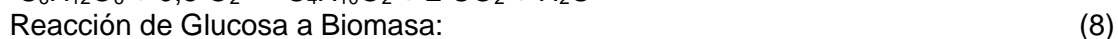
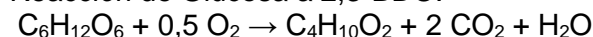
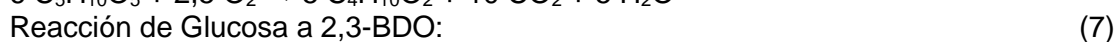
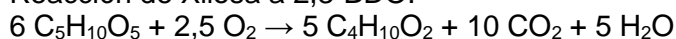
El porcentaje de conversión de celulosa en glucosa se asumió en 70%, mientras que la conversión de hemicelulosa en glucosa y xilosa se asumió en 80%. Por último, la conversión de xilosa en furfural se asumió en 1% (Sánchez et al., 2024).

La reacción de hidrólisis ácida con explosión de vapor ocurre en un tiempo de 30 minutos. Luego el hidrolizado obtenido, junto con el bagazo agotado, pasa a un tanque flash para reducir su contenido de agua, y posteriormente es enviado a una estación de lavado donde se extraen los azúcares fermentables por medio del lavado con agua, obteniéndose una corriente líquida acuosa rica en azúcares fermentables y otra sólida con el bagazo húmedo agotado. La corriente sólida de bagazo húmedo es transferida hacia una prensa de tornillo con el objetivo de extraer la mayor cantidad de agua posible contenida en esta, en donde la corriente líquida es enviada hacia la planta de tratamiento de aguas residuales. El bagazo deshidratado proveniente de la prensa de tornillo es consumido como combustible en una caldera para producir el vapor de agua saturado directo que se emplea en el reactor de hidrólisis, mientras que el vapor de agua sobrante se utiliza como medio de calentamiento en otras áreas del proceso productivo.

Al líquido generado en la planta de lavado se le agrega hidróxido de calcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ en un tanque cilíndrico vertical (tanque de neutralización) con el fin de neutralizar el ácido sulfúrico y el ácido acético, formándose sulfato de calcio y acetato de calcio a través de las reacciones químicas que se presentan a continuación:



El líquido de salida del tanque de neutralización es bombeado hacia un tanque receptor (Tanque 1) y luego es esterilizado antes de ser enviado al fermentador. Una vez en el fermentador ocurren bioreacciones bajo condiciones aerobias donde se forma 2,3-BDO y biomasa a través de las reacciones que muestran a continuación (Gadkari et al., 2023; Sánchez et al., 2024)..



La fermentación dura alrededor de 20 h y se realiza con una tasa de aireación de 0,5 vvm, mientras que el microorganismo empleado en la fermentación es *Enterobacter ludwigii* (Gadkari et al., 2023).

Una vez finalizada la fermentación el caldo es enviado hacia el Tanque 2 y luego hacia una centrífuga de discos donde se separan la biomasa y otros sólidos del sobrenadante. Este sobrenadante es enviado hacia el Tanque 3 y luego a un extractor diferencial donde ocurre la extracción selectiva del 2,3-BDO utilizando alcohol oleílico, el cual presenta un elevado coeficiente de distribución con el 2,3-BDO y una baja solubilidad en agua, lo cual asegura un recobrado máximo de 2,3-BDO desde el caldo de fermentación durante la extracción. El modelo de extracción obtenido por Gadkari et al. 2023 mostró que más del 99% del 2,3-BDO puede ser recuperado con el alcohol oleílico en el extractor diferencial, por tanto las fases orgánicas y acuosas contiene solo una pequeña cantidad

de agua y alcohol oleílico, respectivamente, en donde los azúcares que no reaccionaron, los cuales son altamente polares con una elevada solubilidad en agua, se mantuvieron mayormente en la fase acuosa.

La fase orgánica de salida del extractor diferencial rica en 2,3-BDO y alcohol oleílico es enviada hacia el Tanque 4, posteriormente precalentada y finalmente es transferida hacia una columna de destilación continua donde se obtiene por el tope el 2,3-BDO con una pureza del 99 % y un caudal de 502 kg/lote, mientras que por el fondo se obtiene una corriente rica en alcohol oleílico, la cual pudiera ser tratada para recuperar el alcohol oleílico presente en ella y ser de esta manera reutilizada en el proceso productivo. El 2,3-BDO obtenido en la columna de destilación es almacenado en el Tanque 5 antes de proceder a su comercialización.

En Gadkari et al. (2023) se indica que no se conoce o domina en su totalidad el impacto que pudieran tener las grandes cantidades de azúcares que no reaccionaron sobre el rendimiento del sistema híbrido extracción-destilación, por tanto recomiendan que debería evaluarse como esto pudiera afectar la eficiencia de la extracción y la pureza del producto final basado en estudios experimentales exhaustivos.

2.2. Consideraciones tomadas en cuenta para simular el proceso de producción de 2,3-BDO por la ruta fermentativa en SuperPro Designer®

A continuación, se muestran las consideraciones tomadas en cuenta para simular en SuperPro Designer® el proceso de producción de 2,3-BDO a partir de BCA por la ruta fermentativa.

El costo unitario de la electricidad aplicado en la simulación fue de USD \$ 0,11 kW/h. Se consideró que 35 kW/h por lote son consumidos por equipos no incluidos en el proceso de producción principal. Los salarios de los operadores y supervisores se fijaron en USD \$ 0,71/h y USD \$ 0,83/h, respectivamente. La planta opera 5 meses al año. Se tomó en cuenta un tiempo de construcción de la planta de 20 meses, un período de puesta en marcha de 4 meses y un tiempo de vida proyectado de 25 años. Además, se consideró una tasa de interés del 11 % para determinar el indicador Valor Actual Neto (VAN) del proyecto.

La planta consume los servicios auxiliares electricidad, vapor de agua, agua de enfriamiento y agua fría, mientras que se asumió que se trata de una planta que producirá los 5 primeros años al 80% de su capacidad, los 5 años posteriores al 90% y el resto al 100%. Se supuso que no se desechará producto final por no cumplir con los parámetros de calidad establecidos, es decir, todo lo que se produce se vende. Se realizarán 80 lotes de butanediol por año, en donde la capacidad de producción nominal de 2,3-BDO será de 502 kg/lote y de 40 TM al año. Se escoge esta capacidad de producción anual relativamente baja debido a la poca disponibilidad de bagazo sobrante en las fábricas de azúcar cubanas, lo cual se debe a que casi todo el bagazo que se produce en las fábricas de azúcar cubanas se emplea para la producción de vapor y energía, quedando muy poco bagazo remanente como sustrato para la producción de otros productos tales como 2,3-BDO. El precio de venta del producto 2,3-BDO será escogido más adelante en dependencia de los resultados que se obtengan con respecto al análisis de sensibilidad.

Aspectos como la posibilidad real de obtener la inversión requerida, el origen o fuente de esta inversión, la tasa de financiación necesaria y las posibles restricciones o limitaciones que puedan existir durante el proceso inversionista no fueron incluidos en este trabajo.

La Tabla 2 muestra los valores de los diferentes multiplicadores (denominados “*Factores Lang*”) aplicados al costo de adquisición total del equipamiento para calcular el costo de las diferentes partidas incluidas en la estimación del capital fijo directo, los cuales fueron

seleccionados según recomendaciones reportadas por Harrison et al., (2015) y Peters et al., (2003).

Tabla 2

Valores estimados de los multiplicadores para las partidas incluidas en el capital fijo directo.

Partida de costo	Multiplicador promedio
Costos directos del proceso total (CD)	
Costo de adquisición total del equipamiento (CAE)	
Tuberías del proceso	0,35 x CAE
Instrumentación	0,20 x CAE
Aislamiento	0,15 x CAE
Instalaciones eléctricas	0,15 x CAE
Edificaciones	0,60 x CAE
Mejoras del terreno	0,15 x CAE
Instalaciones auxiliares	0,40 x CAE
Costo de adquisición del equipamiento no listado	0,45 x CAE
Costos indirectos del proceso total (CI)	
Ingeniería	0,40 x CD
Construcción	0,70 x CD
Costo total del proceso (CT = CD + CI)	
Otros costos (OC)	
Pagos al contratista	0,05 x CT
Contingencias	0,15 x CT
Capital fijo directo (CFD = CD + CI + OC)	

Por último, no se tomaron en cuenta los costos relacionados con la investigación y desarrollo y aquellos concernientes a la publicidad y ventas, mientras que se consideraron tanto el mantenimiento como la depreciación en la estimación de la partida relacionada con los costos dependientes de la instalación.

2.3. Costo unitario de materias primas

Las principales materias primas empleadas en el proceso de producción propuesto de 2,3-BDO son BCA, ácido sulfúrico, hidróxido de calcio, alcohol oleílico y agua. El bagazo es la materia prima principal la cual se va a hidrolizar ácida y térmicamente para obtener los azúcares fermentables, el ácido sulfúrico es utilizado en la hidrólisis ácida para desdoblar la celulosa y hemicelulosa en glucosa y xilosa fundamentalmente, el hidróxido de calcio es la materia prima empleada para neutralizar el ácido sulfúrico aún remanente de la hidrólisis ácida, así como también el ácido acético formado durante esta etapa, el alcohol oleílico es empleado para extraer selectivamente el 2,3-BDO contenido en el sobrenadante obtenido en la centrifugación, y el agua se emplea para diluir el ácido sulfúrico hasta la concentración deseada y como medio de lavado y dilución en la estación de lavado, entre otros objetivos. La Tabla 3 expone los costos unitarios empleados en la simulación para cada una de estas materias primas.

Tabla 3

Costo unitario de cada una de las materias primas empleadas en la simulación.

Materia prima	Precio (USD \$)	unidad	Fuente
Alcohol oleílico	0,982	kg	(Gadkari et al., 2023)
Bagazo de caña	20	t	---

Hidróxido de calcio	213,33	t	---
Agua	0,83	m ³	---
Ácido sulfúrico	0,07	kg	(Gadkari et al., 2023)

2.4. Costo de adquisición del equipamiento principal

La Tabla 4 presenta los costos de adquisición del equipamiento principal empleado en el proceso de producción de 2,3-BDO a partir de BCA, los cuales fueron tomados mediante valores reportados por Brown, (2006); Couper et al., (2012); Peters et al., (2003) y Sinnott & Towler, (2020). Estos costos fueron actualizados al mes de marzo del 2025 utilizando el índice de costo de la revista *Chemical Engineering* (Jenkins, 2025) mediante la siguiente ecuación:

$$C_{2025} = C_X \cdot \frac{I_{2025}}{I_X} \quad (10)$$

Dónde:

C_{2025} – Costo del equipamiento en el año 2025 (USD \$).

C_x – Costo del equipamiento en el año X (USD \$)

I_{2025} – Índice de costo para equipamiento de la Revista *Chemical Engineering* para el mes de marzo del 2025 = 987,6 (Jenkins, 2025).

I_x – Índice de costo de la revista *Chemical Engineering* para el año X que se obtuvo el costo del equipo C_x .

Tabla 4

Costo de adquisiciones del equipamiento principal.

Equipamiento	Precio (USD \$)	Característica
Molino triturador	100 000	10 TM/h
Reactor	62 500	45 m ³
Tanque flash	45 000	25 m ³
Caldera	400 000	5 TM/h
Prensa de tornillo	60 000	50 TM/h
Estación de lavado	1 250	70 TM/h
Tanque neutralización	31 250	20 m ³
Tanque 1	35 000	20 m ³
Esterilizador	35 000	40 m ³
Fermentador	250 000	25 m ³
Compresor	125 000	200 kW
Tanque 2	17 000	20 m ³
Centrífuga de discos	50 000	30 m ³
Tanque 3	17 000	50 m ³
Extractor diferencial	42 000	15 m ³
Tanque 4	65 000	32 m ³
Intercambiador de calor 1	36 000	40 m ²
Columna destilación	59 000	16 m
Intercambiador de calor 2	6 250	20 m ²
Tanque 5	7 000	2 m ³

2.5. Estudio de sensibilidad

El simulador SuperPro Designer® puede ser empleado para efectuar un análisis de sensibilidad con respecto a variables claves de diseño después que se haya desarrollado el modelo. Además, el cambio del valor de una variable para determinar su influencia en un parámetro económico global es importante con el fin de analizar la fluctuación técnico-económica o descubrir una oportunidad para optimizar el proyecto (Nugroho et al., 2019).

En este estudio se procedió a realizar un análisis de sensibilidad, para evaluar cómo influye una reducción del precio unitario de venta del butanediol sobre los parámetros VAN, TIR y PRI para así determinar a partir de qué valor de este parámetro la planta de producción de butanediol comienza a no ser factible y rentable desde el punto de vista económico, es decir, se comienza a obtener un valor de VAN negativo. En este sentido, el precio unitario de venta del butanediol se varió entre USD \$ 50 - \$ 250/kg, manteniendo constante a su vez todos los demás parámetros técnicos-económicos.

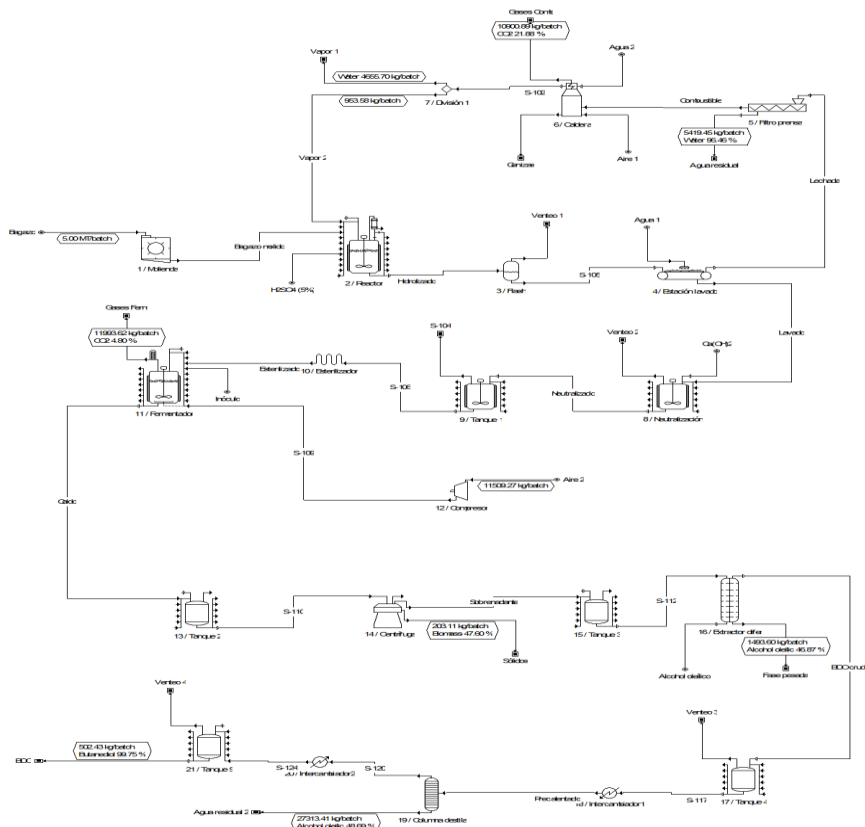
3. Resultados y discusión

El estimado realizado en este estudio se clasifica como *grass-root* de acuerdo con la definición de Green & Southard, (2019) donde se incluyen los estimados de costo de la instalación completa, comenzando con la preparación del sitio, edificaciones, estructuras, equipamiento de procesamiento, servicios auxiliares, instalaciones de almacenamiento, carreteras, etc. Asimismo, el estimado del capital fijo se realiza mediante el estimado clasificado como factorizado o de estudio, el cual requiere conocimiento de los balances de masa y energía preliminares, así como detalles del equipamiento principal. Su exactitud probable es de -25 hasta +30%.

La Figura 1 muestra el diagrama de flujo del proceso de producción de 2,3-BDO obtenido mediante el simulador SuperPro Designer®.

Figura 1

Diagrama de flujo del proceso de producción de 2,3-BDO a partir de bagazo de caña de azúcar obtenido a partir de su simulación en SuperPro Designer®.



Fuente: Elaboración propia.

3.1. Capital fijo directo

La Tabla 5 presenta el desglose de las partidas de costo involucradas en la determinación del capital fijo directo para la planta de producción de 2,3-BDO propuesta en este estudio.

Tabla 5*Partidas de costo involucradas en la determinación del capital fijo directo.*

Partida	Valor (USD \$)
Costo Total Directo de la Planta (CTDP)	
Costo de adquisición del equipamiento	2 740 000
Instalación	1 613 000
Tuberías de proceso	959 000
Instrumentación	548 000
Aislamiento	411 000
Instalaciones eléctricas	411 000
Edificaciones	1 644 000
Mejoras del terreno	411 000
Instalaciones auxiliares	1 096 000
CTDP	9 835 000
Costo Total Indirecto de la Planta (CTIP)	
Ingeniería	3 934 000
Construcción	6 884 000
CTIP	10 818 000
Costo Total de la Planta (CTP = CTDP + CTIP)	20 653 000
Pago al contratista	1 033 000
Contingencia	3 098 000
Capital fijo directo	24 783 000

Para la planta de 2,3-BDO diseñada en este estudio, el costo total del equipamiento tuvo un valor de USD \$ 2 740 000, mientras que los costos de instalación (que involucra mano de obra, cimentación, soportes, plataformas, gastos de construcción y otros factores directamente relacionados con el levantamiento del equipamiento), tubería de proceso (abarca el costo de recubrimiento de tuberías, mano de obra, válvulas, accesorios, aditamentos, soportes y otros complementos involucrados en la erección de todas las tuberías usadas directamente en el proceso para trasegar materias primas, productos intermedios y finales, vapor de agua, agua, aire, residuales, entre otros) e instrumentación (incluye manómetros, sensores de temperatura, flujómetros, etc.) se proyectaron en USD \$ 1 613 000, USD \$ 959 000 y USD \$ 548 000, respectivamente. Otros costos importantes fueron por aislamiento, electricidad (involucra cableado de electricidad, iluminación, transformación y servicio, y cableado de instrumentación y control) y edificaciones (comprende los gastos de mano de obra, materiales y suministros involucrados en la erección de todas las edificaciones conectadas con la planta, incluyendo plomería, calentamiento, enfriamiento, iluminación, ventilación y servicios de edificaciones similares) por un monto de USD \$ 411 000, USD \$ 411 000 y USD \$ 1 644 000, respectivamente. Por último, los costos de mejoras de terreno (contiene los costos de cercado, caminos y carreteras, aceras, desviaderos, decoración, etc.) e instalaciones auxiliares (implica los sistemas para suministrar vapor de agua, agua, electricidad, aire comprimido y combustible) ascendieron a USD \$ 411 000 y USD \$ 1 096 000, respectivamente.

El costo total directo de la planta (CTDP) fue de USD \$ 9 835 000; mientras que el costo total indirecto de la planta (CTIP) fue de USD \$ 10 818 000, que incluía USD \$ 3 934 000 para gastos de ingeniería (abarca el uso de software certificados, dibujos y esquemas realizados por computadora, ingeniería de costo, construcción, contabilidad, viajes, comunicaciones y gastos de oficina más gastos fijos) y USD \$ 6 884 000 para construcción (involucra instalaciones temporales, herramientas de construcción, alquileres, personal de oficina ubicado en el sitio de construcción, nómina de la construcción, impuestos y aseguramiento, viajes y estancia, y otros gastos fijos de construcción).

El costo total de la planta (CTP) (suma de CTDP y CTIP) alcanzó un valor de USD \$ 20 653 000. La suma de los pagos al contratista de USD \$ 1 033 000 y contingencia (gastos

para prever la ocurrencia de eventos inesperados tales como tormentas, inundaciones, accidentes, huelgas, cambios de precios, errores de estimación, cambios en el diseño y otros gastos no previstos) de USD \$ 3 098 000 fue de USD \$ 4 131 000. Finalmente, el capital fijo directo para la planta de producción de 2,3-BDO propuesta fue de USD \$ 24 783 000.

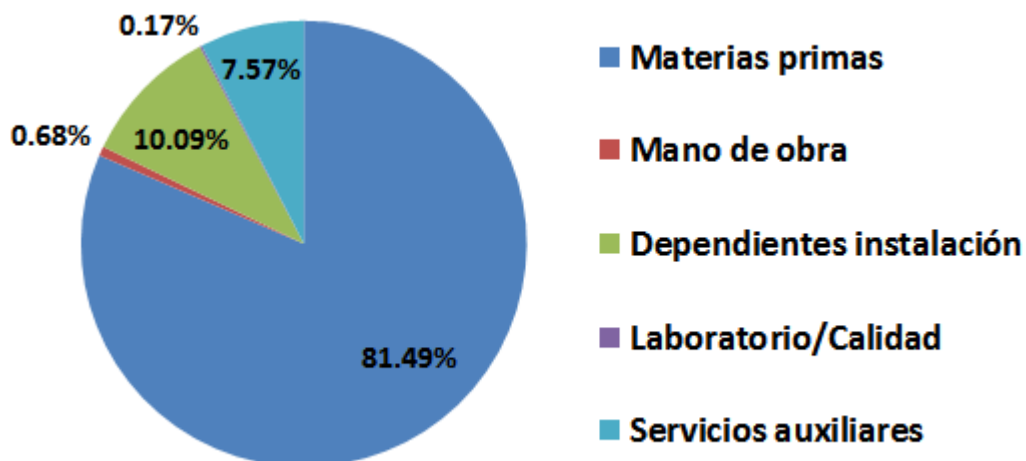
Los costos de instalación (58,87%), edificaciones (60,00%), e ingeniería (15,87%) se encuentran fuera del rango porcentual reportado por Peters et al., (2003) para estas partidas, los cuales son de 25-55% del costo de adquisición del equipamiento, 47% del costo de adquisición del equipamiento y 8% del capital fijo directo, respectivamente. Por su parte, las partidas de costo relacionadas con tuberías (58,87%), instrumentación (20%), instalaciones eléctricas (15%), mejoras del terreno (15%) e instalaciones auxiliares (40%) se encuentran dentro de los rangos reportados por (Peters et al., 2003) para estas partidas, las cuales son de 20-80%, 8-50%, 15-30%, 10-20% y 30-80% del costo de adquisición del equipamiento respectivamente. Por su parte, los costos relativos al pago al contratista (4,17%) y contingencia (12,50%) estuvieron dentro de los rangos sugeridos por Peters et al., (2003), los cuales son de 1,5-6,0% y 5,0-15,0% del capital fijo directo, respectivamente.

3.2. Costos de operación

El costo de operación de una planta biotecnológica es la suma de todos los gastos en curso incluyendo materias primas, mano de obra, material gastable, servicios auxiliares, vertimiento de residuales y gastos de la instalación. La Figura 2 presenta la contribución porcentual de cada una de las partidas incluidas en los costos de operación del proceso de producción de 2,3-BDO, los cuales se obtuvieron mediante el simulador SuperPro Designer®.

Figura 2

Desglose de las partidas involucradas en el costo de operación del proceso de producción del 2,3-BDO a partir de bagazo de caña de azúcar.



Fuente: Elaboración propia.

Como bien se puede observar en la Figura 2, los costos de las materias primas abarcan el 81,49% de los costos de operación de la planta de producción de 2,3-BDO, lo cual está en concordancia con lo reportado por Harrison et al. (2015) con respecto a la influencia de la partida de materias primas sobre los costos de operación de una planta biotecnológica, la cual oscila entre 10-85%. Esto se debe a la cantidad relativamente

elevada de materias primas consumidas en el proceso productivo por año, gastándose USD \$ 1,208 millones anuales por este concepto.

La segunda partida de mayor influencia es la dependiente de la instalación, con 10,09% (USD \$ 150 000/año), la cual incluye la depreciación de la inversión de capital fijo y los costos por mantenimiento. Esta partida de costo se encuentra dentro del rango reportado por Harrison et al. (2015) de 10-70%, y presenta ese valor debido al elevado mantenimiento que debe realizarse para mantener operativa la instalación productiva, así como también debido a la intensa depreciación a la que está sometida dicha planta de producción.

Por último, los servicios auxiliares constituyen la tercera partida que más influye en los costos de operación, con 7,57% (USD \$ 112 000/año), valor que se encuentra dentro del rango de 1-30% reportado por Harrison et al. (2015). Esto se debe a la cantidad relativamente elevada de servicios auxiliares que consume dicha planta, fundamentalmente agua fría (tanque de neutralización, fermentador, centrifuga de discos, e intercambiador de calor 2), agua de enfriamiento (compresor y condensador de la columna de destilación) y vapor de agua (intercambiador de calor 1, rehervidor de la columna de destilación). Por último vale destacar el bajo valor del porcentaje relacionado con la mano de obra (0,68%), muy por debajo del rango de 10-50% sugerido por Harrison et al. (2015) lo cual se debe fundamentalmente a los bajos salarios que existen actualmente en Cuba en sentido general.

En Gadkari et al. (2023) se estudió la producción fermentativa de 2,3-BDO a partir de bagazo de caña de azúcar considerando cinco escenarios de proceso diferentes. El primer escenario (llamado caso base) asume que el bagazo se obtiene sin costo, que la planta de producción de 2,3-BDO se encuentra anexa a una fábrica de azúcar, y que todos los servicios auxiliares requeridos por el proceso se generan en la misma instalación combinada. El segundo escenario asume que el bagazo tiene un costo de USD \$ 50/TM, manteniendo constantes el resto de los factores implementados en el escenario 1. El tercer escenario asume que la planta de producción de 2,3-BDO no está anexa a una fábrica de azúcar, sino que es una instalación autosostenible. El cuarto escenario es una combinación del segundo y tercer escenario, donde se incluyen los costos de tanto el bagazo (USD \$ 50/TM) como los servicios auxiliares, y se refiere a una instalación autosostenible. El quinto escenario se construye sobre el cuarto escenario, representando una planta de producción autosostenible donde la fracción de celulosa, la cual se utilizaba previamente para la generación de vapor/electricidad, se emplea aquí para la producción de 2,3-BDO, requiriendo por tanto una etapa adicional de hidrólisis enzimática para convertir la fracción de celulosa en glucosa antes de que sea usada para la producción de 2,3-BDO.

En este estudio, la depreciación, mantenimiento y gastos de la fábrica fueron las partidas de mayor contribución en el costo de operación para el escenario 1, con 31, 21 y 19% respectivamente, en donde las materias primas tuvieron una contribución de solo 13%, debido fundamentalmente a que el bagazo no presenta costo. En el escenario 2, las materias primas fue la partida que más contribuyó en los costos de operación con 42%, debido a que el bagazo tiene costo, mientras que la depreciación (21%), mantenimiento (14%) y gastos de la fábrica (12%) fueron las otras partidas de mayor influencia. Para el caso del escenario 3, el costo de los servicios auxiliares se convirtió en la partida de mayor influencia en el costo de operación anual con casi 38%, seguido de la depreciación (19,8%), mantenimiento (13,9%) y gastos de la fábrica (10,9%). Analizando el escenario 4, las materias primas (30%) y servicios auxiliares (29%) son las partidas de mayor influencia, debido fundamentalmente a que el bagazo tiene costo. Finalmente, el caso 5 tuvo como a las materias primas (30%) y servicios auxiliares (30%) como los mayores contribuyentes en el costo de operación, seguido de la depreciación (14%), siendo el escenario con el mayor valor de costo de operación con USD \$ 9 050

000 debido fundamentalmente al costo de las enzimas para convertir la celulosa en glucosa.

En Sánchez et al. (2024), las partidas que más influyeron en los costos anuales de operación fueron los dependientes de la instalación (53%), servicios auxiliares (24%) y materias primas (13%), para una planta de producción de 2,3-BDO con una capacidad de producción anual de 20 000 TM de 2,3-BDO procesando 17,6 TM de BCA por hora.

3.3. Costos de materias primas

La Tabla 6 exhibe el desglose del costo por consumo de materias primas, junto con su demanda anual y el porcentaje de contribución.

Tabla 6

Demanda anual, costo, y contribución porcentual de las materias primas.

Materia prima	Demanda anual	Costo anual (USD \$)	%
Alcohol oleílico	1 120 000 kg	1 099 940	91,03
Bagazo	441 t	8 818	0,73
Hidróxido de calcio	71 t	15 050	1,25
Agua	524 m3	435	0,04
Ácido sulfúrico	1 200 000 kg	84 000	6,95
TOTAL	-	1 208 144	100,00

Como bien se puede observar en la Tabla 6, el alcohol oleílico presenta la mayor contribución en el costo de las materias primas con 91,03%, lo cual se debe a su elevada demanda anual (1 120 000 kg), y ser la materia prima con el mayor costo unitario (USD \$ 0,98/kg) de todas. En segundo lugar, se encuentra el ácido sulfúrico con 6,95%, debido fundamentalmente a su elevada demanda anual (1 200 000 kg).

3.4. Análisis de sensibilidad

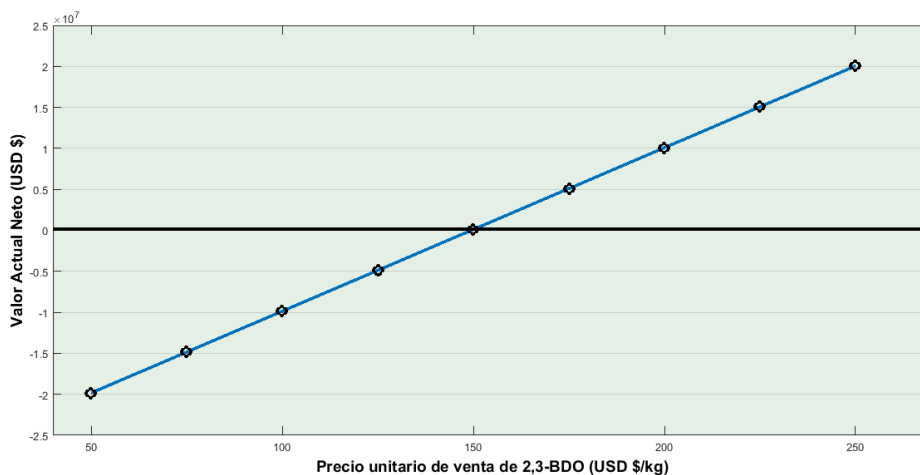
El consumo anual de BCA seleccionado en nuestro estudio será de 400 TM, el cual es muy inferior a lo reportado por (Sánchez et al., 2024) de 17,6 TM/h, y lo reportado por (Gadkari et al., 2023) de 96 TM/d. Se escogió esta pequeña tasa de consumo de BCA debido a que, según varios directivos de diferentes industrias azucareras de la provincia de Camagüey, Cuba, en las fábricas de azúcar cubanas queda muy poco bagazo sobrante debido a que casi todo el que se genera se emplea como combustible para la producción de electricidad y vapor, lo cual influye en que casi no quede bagazo sobrante como materia prima principal para la producción de compuestos químicos derivados tales como etanol, xilitol, 2,3-BDO, ácido cítrico, enzimas, etc., por la ruta fermentativa. A todo esto se le suma que, en el caso específico de Cuba, el total de caña de azúcar molida ha ido decreciendo en los últimos años, siendo de 17,1 MMT en la zafra del 2018/19; 13,9 MMT en la zafra 2019/20 y 10,2 MMT en la zafra del 2020/21 (ONEI, 2025).

En este estudio se realizó un análisis de sensibilidad para determinar a partir de qué valor del precio de venta del 2,3-BDO el proyecto comienza a ser no factible y rentable, es decir, se comienza a obtener un valor de VAN negativo. Para ello se varió el precio de venta del producto 2,3-BDO entre USD \$ 50 - \$ 250/kg, y se graficó la influencia de este rango sobre los indicadores VAN, Tasa Interna de Retorno (TIR) y Período de Recuperación de la Inversión (PRI). La Figura 3 presenta los gráficos obtenidos en MATLAB relacionados con el estudio de sensibilidad para los tres indicadores analizados.

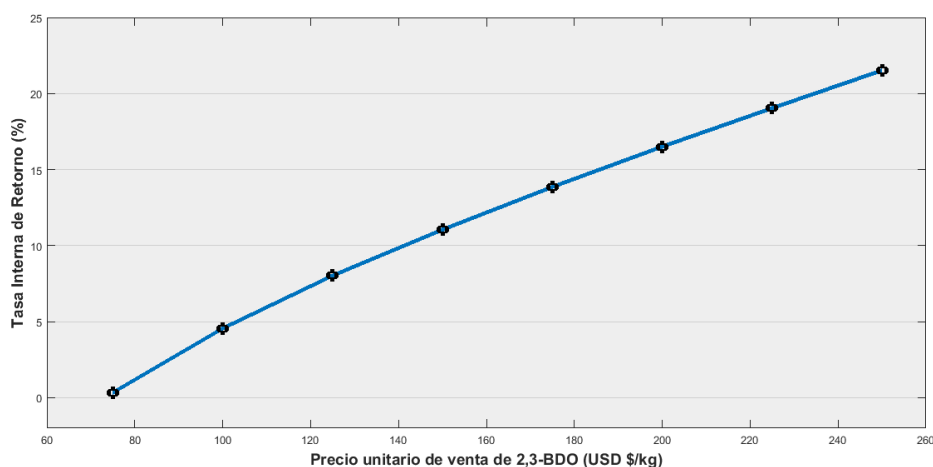
Figura 3

Resultados del análisis de sensibilidad con respecto a:

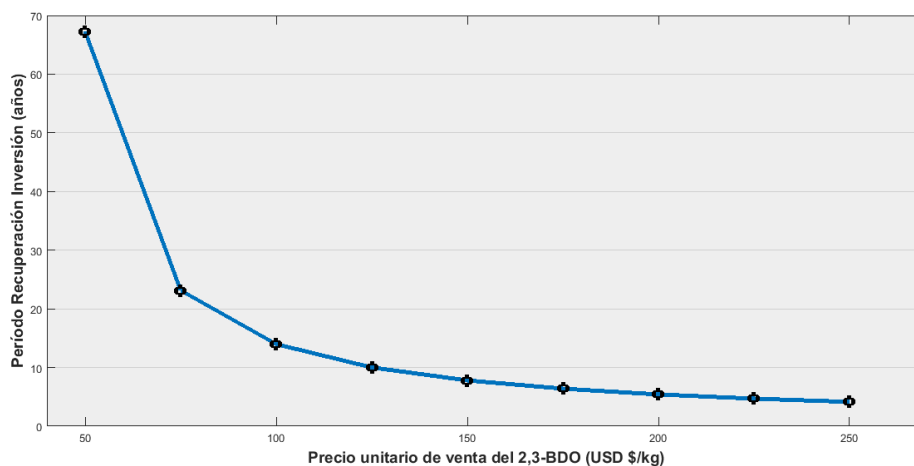
- Valor Actual Neto (VAN).*
- Tasa Interna de Retorno (TIR).*
- Período de Recuperación de la Inversión (PRI).*



a)



b)



c)

Fuente: Elaboración propia.

Como bien se puede observar en la Figura 3, evidentemente el incremento del precio de venta del producto 2,3-BDO aumenta el valor del VAN y TIR, y reduce el valor del PRI, mientras que se comienza a obtener un valor de VAN negativo a partir de un precio unitario de venta del 2,3-BDO menor de USD \$ 150/kg. Este precio unitario de venta mínimo de USD \$ 150/kg aún se encuentra muy por encima de los precios de venta reportados por (Gadkari et al., 2023) de USD \$ 1,860/kg – 3,990/kg, y por (Sánchez et

al., 2024) de USD \$ 3,5/kg para plantas de producción de 2,3-BDO a partir de BCA por la ruta fermentativa simuladas en SuperPro Designer®.

Considerando que un proyecto de planta química comienza a ser atractivo si dispone de un valor de VAN positivo (Lam et al., 2014), una TIR entre 15-30% y un PRI menor de 5 años (Lee et al., 2018), los autores de este trabajo procedimos a seleccionar un precio unitario de venta del 2,3-BDO de USD \$ 220/kg debido a que bajo este valor se comienza a obtenerse un VAN positivo (USD \$ 14 067 000), una TIR superior a 15% (18,56 %) y un PRI inferior a los 5 años (4,82 años), como bien se podrá verificar en el siguiente acápite.

3.5. Indicadores de rentabilidad

La estimación de la inversión de capital, el costo de operación y las ganancias de un proyecto suministran la información necesaria para evaluar su rentabilidad, factibilidad y atractivo desde el punto de vista inversionista. El análisis económico realizado en este estudio suministra información valiosa que permite decidir si el proyecto de planta de producción de 2,3-BDO es factible o no de implementar bajo las condiciones económicas actuales de Cuba.

La Tabla 7 desglosa los principales indicadores de rentabilidad calculados por el simulador SuperPro Designer® para el proceso de producción de 2,3-BDO a partir de bagazo por la ruta fermentativa, considerando un precio de venta del 2,3-BDO de USD \$ 220/kg.

Tabla 7

Principales indicadores de rentabilidad del proceso productivo para un precio unitario de venta del 2,3-BDO de USD \$ 220/kg.

Indicador	Valor
Inversión total de capital (USD \$)	26 589 000
Capital fijo directo (USD \$)	24 783 000
Costo de operación (USD \$/año)	1 483 000
Ganancias (USD \$/año)	8 843 000
Tamaño del lote (kg 2,3-BDO/lote)	502,43
Capacidad de la planta (TM 2,3-BDO/año)	40,194
Costo unitario de producción (USD \$/kg)	36,89
Capital de trabajo (USD \$)	71 000
Costo de arrancada (USD \$)	1 735 000
Impuestos (25%) (USD \$/año)	1 840 000
Ganancia neta (USD \$/año)	5 520 000
Margen bruto (%)	83,23
Retorno de la inversión (%)	20,76
Período de recuperación de la inversión (años)	4,82
Tasa Interna de Retorno (%)	18,56
Valor Actual Neto (para 11% de interés) (USD \$)	14 067 000

Los resultados de la Tabla 7 indican que, para una planta que produce alrededor de 502 kg y 40 TM de 2,3-BDO por lote y por año respectivamente, se necesita una inversión total de capital de 26,589 millones para construir la planta propuesta, con un capital fijo directo de USD \$ 24,783 millones. Los costos de operación tuvieron un valor de USD \$ 1,483 millones, con unas ganancias anuales de USD \$ 8,843 millones.

El capital de trabajo (referido a fondos requeridos para operar el negocio, que involucra la inversión de materias primas, gastables, salario, etc.) tuvo un valor de USD \$ 71 000, con un costo de arrancada (comprende gastos únicos de pre-arrancada incurridos para

preparar una nueva planta para su operación comercial) de USD \$ 1,735 millones, impuestos de USD \$ 1,840 millones y una ganancia neta de USD \$ 5,520 millones.

El margen bruto, el cual se calcula dividiendo la ganancia bruta entre los ingresos, fue de 83,23%, el cual puede considerarse elevado. El retorno de la inversión, que se calcula dividiendo la ganancia neta anual entre la inversión total, tuvo un valor de 20,76%, mientras que el período de recuperación de la inversión, el cual es el tiempo requerido para recuperar el costo de la inversión, y es calculado dividiendo la inversión total entre la ganancia neta anual, presentó un valor de 4,82 años.

Por último, la TIR, definida como la tasa de retorno bajo la cual el proyecto presenta un valor de VAN igual a cero, y representa la rentabilidad intrínseca promedio de un proyecto, tuvo un valor de 18,56%, la cual puede considerarse de aceptable, mientras que el valor de VAN positivo obtenido (USD \$ 14 067 millones), el cual se define como el valor total de los flujos de efectivo neto futuros extendidos sobre el tiempo de vida del proyecto, indica que el proyecto de planta de producción de 2,3-BDO puede considerarse factible y rentable, siempre y cuando se considere un valor del precio unitario de venta del 2,3-BDO de USD \$ 220/kg.

En Gadkari et al. (2023), la inversión total de capital osciló entre USD \$ 22,401 millones para el escenario 1 y USD \$ 30,597 millones para el escenario 5, con unos costos de operación anuales que oscilaron entre USD \$ 3,056 millones y USD \$ 9,050 millones para el escenario 1 y 5, respectivamente. El retorno de la inversión fluctuó entre 5,33 % para el escenario 4 y 29,99% para el escenario 5, mientras que el período de recuperación de la inversión osciló entre 3,33 años para el escenario 5 y 18,70 años para el escenario 4. Por último, se obtuvieron valores de VAN que oscilaron entre USD \$ – 14,156 millones y USD \$ 71,914 millones para el escenario 4 y 5 respectivamente. La capacidad de producción anual de la planta simulada en este estudio fue de 29 952 TM de 2,3-BDO, procesando 96 TM de BCA por día con 312 días de operación.

En Sánchez et al. (2024) la inversión total de capital tuvo un valor de USD \$ 132,075 millones, con un costo anual de operación de USD \$ 37,472 millones. Por su parte, el retorno de la inversión fue de 25,26%, el PRI fue de 3,95 años, la TIR fue de 19,90% y el VAN fue de USD \$ 310,5 millones, para una planta con una capacidad de producción de 20,000 TM de 2,3-BDO por año, capaz de procesar 17,6 TM de bagazo por hora.

3.6. Costo unitario de producción y precio unitario de venta del 2,3-BDO

De acuerdo con la Tabla 7, el costo unitario de producción del 2,3-BDO tuvo un valor de USD \$ 36,89/kg, el cual es 19,59 veces superior al costo unitario de producción reportado por Sánchez et al. (2024) de USD \$ 1,88/kg, y entre 32,64 y 16,18 veces superior al costo unitario de producción reportado por Gadkari et al. (2023), el cual tuvo un valor mínimo de USD \$ 1,130/kg para el escenario 1, y un valor máximo de USD \$ 2,280/kg para el escenario 4. Esto se debe fundamentalmente a la inferior capacidad de producción de 2,3-BDO que presenta la planta de nuestro estudio (40 TM/año) en comparación con las elevadas capacidades de producción reportadas por Sánchez et al. (2024) de 20 000 TM/año y por Gadkari et al. (2023) de 29 952 TM/año.

Debido a que el costo unitario de producción se calcula dividiendo el costo de operación anual entre la tasa de producción anual (Harrison et al., 2015), mientras mayor sea la tasa o capacidad de producción anual de la planta, más bajo será este costo unitario de producción i.e. mientras más cantidad se produzca del producto principal más bajo será el valor del costo unitario de producción y más barato se podrá vender el producto. Estos autores también indican que el costo unitario y el precio de venta de bioproductos son inversamente proporcionales al tamaño del mercado (Harrison et al., 2015). Para Cheali et al. (2015), el incremento de la capacidad de la planta decrece el costo unitario de producción.

Por otro lado, el costo unitario de producción calculado en nuestro estudio se encuentra dentro del rango reportado por Harrison et al. (2015) de USD \$ 5 hasta USD 100/kg para compuestos químicos obtenidos por la ruta fermentativa utilizados como suplementos alimenticios (vitaminas), agentes saborizantes, alcoholes, ácidos orgánicos, azúcares, etc.

En Mailaram et al. (2022) el costo unitario de producción de 2,3-BDO fue de USD \$ 1,74-1,84/kg para una capacidad de procesamiento de 100 TM de afrecho cervecero por día, y de USD \$ 1,07/kg para una capacidad de procesamiento de 2 000 TM de afrecho cervecero por día.

Según Gadkari et al. (2023), el precio actual de 2,3-BDO en el mercado es de ~ USD \$ 2,8 - 3,5/kg, el cual es entre 78,5 y 62,8 veces inferior al precio de venta fijado en nuestro estudio de USD \$ 220/kg, el cual fue establecido en este valor para que la planta propuesta simulada en SuperPro Designer® entregara resultados económicos rentables y factibles. También, el precio de venta fijado en nuestro estudio es 62,8 veces superior que el precio de venta fijado en (Sánchez et al., 2024) de USD \$ 3,5/kg, mientras que es entre 55,1 y 118,3 veces superior que el precio de venta fijado en Gadkari et al. (2023) de USD \$ 1,86/kg y 3,99/kg para los escenarios 5 y 4 respectivamente.

Entre las opciones que sugiere Lahiri, (2020) para maximizar las ganancias de una planta de producción química, y con ellos reducir el costo de producción, se tienen:

- Maximizar la tasa de producción de cada producto o la tasa de producción total: Se basa en que la planta opere a la más alta capacidad posible o reducir los cuellos de botella para que produzca más.
- Maximizar el valor de las ventas de la unidad: La producción de un producto de calidad superior y el establecimiento de una imagen de la marca inteligente o reputación sólida puede conducir a mayores ventas. Un buen enfoque en el consumidor y un servicio postventa genuino puede influenciar en esto.
- Maximizar la tasa de producción del producto suministra un alto margen de ganancia: No todos los productos ganan el mismo margen de ganancia. Algunos productos tienen margen de ganancia más elevados comparados con otros. La maximización de la tasa de producción del producto para buscar un mayor margen de ganancia puede ser obtenida mediante el sacrificio del producto de bajo margen.
- Minimizar la tasa de consumo de materia prima: En la industria de procesos el consumo de materias primas puede llegar a ser la mayor porción del costo del costo de producción. De esta manera, la reducción del consumo de materias primas mientras se mantiene el mismo objetivo de producción tendrá un elevado impacto en la rentabilidad. El consumo específico de las materias primas puede ser reducido mediante el incremento de la selectividad del catalizador, incremento del rendimiento del proceso, reducción de los residuales, incrementando la eficiencia del proceso, incrementando la pureza de la materia prima, etc.
- Minimizar el costo unitario de la materia prima: Esto se basa en la selección de un buen suministro de los vendedores a un precio barato, estableciendo un contrato a largo plazo con el vendedor para la negociación del precio, explorando el mapa del mundo para la buscar fuentes de materias primas, reducir los costos de transportación de las materias primas, efectuar la mezcla de materias primas baratas, etc.
- Minimizar el consumo de servicios auxiliares: Esto se logra mediante la realización de una auditoría energética detallada con el fin de identificar áreas donde se pierde energía o servicios auxiliares; incrementar la eficiencia de energía en equipos de proceso energéticamente intensivos, e incrementar la

transferencia de calor proceso-proceso siempre que sea posible, mediante estudios *pinch* de la red de intercambiadores de calor y columnas de destilación.

- Minimizar el costo de servicios auxiliares: Significa identificar una fuente barata de energía y poner inversión de capital para reducir el costo por unidad de servicio auxiliar.

Tomando en cuenta el elevado costo unitario de producción obtenido, se puede establecer que el proceso de producción propuesto en este estudio no es competitivo con respecto a los precios internacionales establecidos para el 2,3-BDO, lo cual se debe fundamentalmente a la baja capacidad de producción de la planta evaluada, la cual es casi 749 veces menor que la capacidad de producción reportada por Gadkari et al. (2023) y 500 veces menor que la capacidad de producción reportada por Sánchez et al. (2024). Esta baja capacidad de producción influye en que se obtenga un elevado costo unitario de producción según lo indicado por Harrison et al. (2015) y, con ello, un elevado precio de venta del producto 2,3-BDO para que la planta sea rentable y viable desde el punto de vista económico, el cual no resulta competitivo comparado con otros estudios y con el precio del 2,3-BDO en el mercado internacional.

4. Conclusiones

En el presente trabajo se simuló y diseño conceptualmente un proceso de producción de 2,3-BDO a partir de BCA por la ruta microbiana, en donde se determinaron varios indicadores económicos y de rentabilidad por medio del uso del simulador SuperPro Designer® en el contexto económico actual de Cuba. Para un precio unitario de venta del 2,3-BDO de USD \$ 220/kg se obtiene un VAN positivo (USD \$ 14,067 millones), una TIR entre 15-30% (18,56%) y un periodo de recuperación de la inversión menor de 5 años (4,82 años), lo cual clasifica el proyecto de rentable y factible siempre y cuando se fije este precio unitario de venta.

El proceso tecnológico propuesto en este estudio no logra ser competitivo y atractivo, debido a que el precio unitario de venta del 2,3-BDO seleccionado (USD \$ 220/kg) es muy superior a los valores de este parámetro establecidos tanto a escala internacional (USD \$ 2,8-3,5/kg). Esto se debe fundamentalmente a la baja capacidad de producción de 2,3-BDO establecida para la planta propuesta en este estudio en comparación con la de otros trabajos, lo cual es ocasionado por la poca disponibilidad de BCA sobrante por parte de las fábricas de azúcar cubanas.

Se recomienda efectuar una evaluación técnico-económica del proceso de 2,3-BDO sugerido en este estudio por medio de la simulación en SuperPro Designer®, pero incrementando la capacidad de procesamiento del BCA de la propuesta tecnológica, con el fin de producir una mayor cantidad de 2,3-BDO que permita determinar si el proyecto será competitivo a escala internacional bajo las condiciones económicas actuales de Cuba.

Contribución de los autores: Conceptualización, LJ-G.; metodología, AP-S. y LJ-G.; software, AP-S.; validación, DDA-G-M.; análisis formal, AP-S. y LJ-G.; investigación, LJ-G., AP-S., DDA-G-M.; recursos, LJ-G.; redacción del borrador original, AP-S., DDA-G-M.; redacción, revisión y edición, LJ-G.; visualización, LJ-G. y DDA-G-M.; supervisión, LJ-G. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito

Financiamiento: Esta investigación no ha recibido financiación externa.

Agradecimientos: A la Fábrica de azúcar Siboney de Camagüey, Cuba, por la ayuda desinteresada brindada.

Conflicto de interés: Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias Bibliográficas

- Afschar, A. S., Bellgardt, K. H., Rossell, C. E. V., Czok, A., & Schaller, K. (1991). The production of 2,3-butanediol by fermentation of high test molasses. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 34, 582-585. <https://doi.org/10.1007/BF00167903>
- Amraoui, Y., Narisetty, V., Coulon, F., Agrawal, D., Chandel, A. K., Maina, S., . . . Kumar, V. (2021). Integrated Fermentative Production and Downstream Processing of 2,3-Butanediol from Sugarcane Bagasse-Derived Xylose by Mutant Strain of *Enterobacter ludwigii*. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 9, 10381-10391. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c03951>
- Brown, T. (2006). *Engineering Economics and Economic Design for Process Engineers*. CRC Press.
- Cheali, P., Gernaey, K. V., & Sin, G. (2015). Uncertainties in early-stage capital cost estimation of process design – a case study on biorefinery design. *Frontiers in Energy Research*, 3(3), 1-13. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2015.00003>
- Cho, S., Kim, T., Woo, H. M., Lee, J., Kim, Y., & Um, Y. (2015). Enhanced 2,3-Butanediol Production by Optimizing Fermentation Conditions and Engineering *Klebsiella oxytoca* M1 through Overexpression of Acetoin Reductase. *PLoS ONE*, 10(9), e0138109. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0138109>
- Couper, J. R., Penney, W. R., Fair, J. R., & Walas, S. M. (2012). *Chemical Process Equipment Selection and Design* (3rd ed.). Butterworth-Heinemann.
- Ebrahimian, F., & Mohammadi, A. (2024). Bioprocess Design and Technoeconomic Analysis of 2,3-Butanediol Production in Wood-Based Biorefineries. *Waste and Biomass Valorization*, 15, 6635–6648. <https://doi.org/10.1007/s12649-024-02611-3>
- Gadkari, S., Narisetty, V., Maity, S. K., Manyar, H., Mohanty, K., Jeyakumar, R. B., . . . Kumar, V. (2023). Techno-Economic Analysis of 2,3-Butanediol Production from Sugarcane Bagasse. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 11, 8337-8349. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.3c01221>
- Garg, S. K., & Jain, A. (1995). Fermentative production of 2,3-butanediol: A review. *Bioresource Technology*, 51, 103-109. [https://doi.org/10.1016/0960-8524\(94\)00136-O](https://doi.org/10.1016/0960-8524(94)00136-O)
- Green, D. W., & Southard, M. Z. (2019). *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (9th ed.). McGraw-Hill Education.
- Harrison, R. G., Todd, P. W., Rudge, S. R., & Petrides, D. P. (2015). *Bioseparations Science and Engineering* (2nd ed.). Oxford University Press.
- Hazeena, S. H., Shurpali, N. J., Siljanen, H., Lappalainen, R., Anoop, P., Adarsh, V. P., . . . Binod, P. (2022). Bioprocess development of 2, 3butanediol production using agroindustrial residues. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 45, 1527–1537. <https://doi.org/10.1007/s00449-022-02761-5>
- Jenkins, S. (2025). Economic Indicators. *Chemical Engineering*, 132(6), 44.
- Köpke, M., Mihalcea, C., Liew, F., Tizard, J. H., Ali, M. S., Conolly, J. J., . . . Simpson, S. D. (2011). 2,3-Butanediol Production by Acetogenic Bacteria, an Alternative Route to Chemical Synthesis, Using Industrial Waste Gas. *Applied and Environmental Microbiology*, 77(15), 5467–5475. <https://doi.org/10.1128/AEM.00355-11>

Koutinas, A. A., Yepez, B., Kopsahelis, N., Freire, D. M. G., Castro, A. M. d., Papanikolaou, S., & Kookos, I. K. (2016). Techno-economic evaluation of a complete bioprocess for 2,3-butanediol production from renewable resources. *Bioresource Technology*, 204, 55-64. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2015.12.005>

Lahiri, S. K. (2020). *Profit Maximization Techniques for Operating Chemical Plants*. John Wiley & Sons Ltd.

Lam, K. F., Leung, C. C. J., Lei, H. M., & Lin, C. S. K. (2014). Economic feasibility of a pilot-scale fermentative succinic acid production from bakery wastes. *Food and Bioproducts Processing*, 92, 282-290. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fbp.2013.09.001>

Lee, C. S., Chong, M. F., Binner, E., Gomes, R., & Robinson, J. (2018). Techno-economic assessment of scale-up of bio-flocculant extraction and production by using okra as biomass feedstock. *Chemical Engineering Research and Design*, 132, 358-369. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.01.050>

Lee, Y., & Seo, J. (2019). Production of 2,3-butanediol from glucose and cassava hydrolysates by metabolically engineered industrial polyploid *Saccharomyces cerevisiae*. *Biotechnology for Biofuels*, 12, 204. <https://doi.org/10.1186/s13068-019-1545-1>

Mailaram, S., Narisetty, V., Ranade, V. V., Kumar, V., & Maity, S. K. (2022). Techno-Economic Analysis for the Production of 2,3-Butanediol from Brewers' Spent Grain Using Pinch Technology. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 61, 2195–2205. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c04410>

Narisetty, V., Amraoui, Y., Abdullah, A., Ahmad, E., Agrawal, D., Parameswaran, B., . . . Kumar, V. (2021). High yield recovery of 2,3-butanediol from fermented broth accumulated on xylose rich sugarcane bagasse hydrolysate using aqueous two-phase extraction system. *Bioresource Technology*, 337, 125463. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125463>

Narisetty, V., Narisetty, S., Jacob, S., Kumar, D., Leeke, G. A., Chandel, A. K., . . . a, V. K. (2022). Biological production and recovery of 2,3-butanediol using arabinose from sugar beet pulp by *Enterobacter ludwigii*. *Renewable Energy*, 191, 394-404. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.04.024>

Nugroho, D. S., Yu-Shen, C., Chou, T.-H., Hartini, N., & Chiu, H.-Y. (2019). Antifungal Lotion as Value-Added Product for Harvested BSFL Processing: Simple Process Design and Economic Evaluation. *Jurnal Bahan Alam Terbarukan*, 8(2), 124-132. <https://doi.org/10.15294/jbat.v8i2.22794>

Okonkwo, C. C., Duduyemi, A., Ujor, V. C., Atiyeh, H. K., Iloba, I., Qureshi, N., & Ezeji, T. C. (2023). From Agricultural Wastes to Fermentation Nutrients: A Case Study of 2,3-Butanediol Production. *Fermentation*, 9, 36. <https://doi.org/10.3390/fermentation9010036>

ONEI. (2025). Industria Manufacturera. <https://www.onei.gob.cu/industria-manufacturera>

Pahlavanzadeh, H., Khayati, G., & Vasheghani-Farahani, E. (2009). Extractive Capacity of Oleyl Alcohol on 2, 3-Butanediol Production in Fermentation Process with Use of

Klebsiella pneumoniae PTCC 1290. *Iran. J. Chem. Chem. Eng.*, 28(3), 103-109. <https://doi.org/10.30492/ijcce.2009.6853>

Peters, M. S., Timmerhaus, K. D., & West, R. E. (2003). *Plant Design and Economics for Chemical Engineers* (5th ed.). McGraw-Hill.

Radoš, D., Carvalho, A. L., Wieschalka, S., Neves, A. R., Blombach, B., Eikmanns, B. J., & Santos, H. (2015). Engineering *Corynebacterium glutamicum* for the production of 2,3-butanediol. *Microbial Cell Factories*, 14, 171. <https://doi.org/10.1186/s12934-015-0362-x>

Rehman, S., Islam, M. K., Khanzada, N. K., Zhuang, H., Wang, H., Chaiprapat, S., & Leu, S.-Y. (2021). Sustainability index accounting food and carbon benefits on circular 2,3-butanediol biorefinery with oil palm empty fruit bunches. *Applied Energy*, 303, 117667. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117667>

Roncal, T., Maestro, B., & Prieto-Fernandez, S. (2023). Fermentative production of 2,3-butanediol from cheese whey by a non-engineered mutant strain of *Lactococcus lactis*. *Bioresource Technology Reports*, 24, 101637. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101637>

Rosales-Calderon, O., & Arantes, V. (2019). A review on commercial scale high value products that can be produced alongside cellulosic ethanol. *Biotechnology for Biofuels*, 12, 240. <https://doi.org/10.1186/s13068-019-1529-1>

Sánchez, A. P., Misailidis, N., Ferreira, R. G., & Petrides, D. (2024). 2,3-Butanediol (BDO) Production from Sugarcane Bagasse via Fermentation - Process Modeling and Evaluation using SuperPro Designer®. *ReadMe File*, 1-20. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11927.38564>

Sikazwe, M. K., Louw, J., & Görgens, J. F. (2024). Microbe and bioprocess performances for sustainable production of biobased 2,3-butanediol in a sugarcane biorefinery; a techno-economic and environmental analysis. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 26, 4505-4519. <https://doi.org/10.1007/s10098-024-02843-w>

Sinnott, R., & Towler, G. (2020). *Chemical Engineering Design* (6th ed.). Oxford, UK: Butterworth-Heinemann.

Stoklosa, R. J., Latona, R. J., & Johnston, D. B. (2022). Assessing oxygen limiting fermentation conditions for 2,3-butanediol production from *Paenibacillus polymyxa*. *Frontiers in Chemical Engineering*, 4, 1038311. <https://doi.org/10.3389/fceng.2022.1038311>

Suttikul, S., Charalampopoulos, D., & Chatzifragkou, A. (2023). Biotechnological Production of Optically Pure 2,3-Butanediol by *Bacillus subtilis* Based on Dissolved Oxygen Control Strategy. *Fermentation*, 9, 15. <https://doi.org/10.3390/fermentation9010015>

Tinôco, D., Borschiver, S., Coutinho, P. L., & Freire, D. M. G. (2020). Technological development of the bio-based 2,3-butanediol process. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. <https://doi.org/10.1002/bbb.2173>

Tiwari, B. R., Bhar, R., Dubey, B. K., Maity, S. K., Brar, S. K., Kumar, G., & Kumar, V. (2023). Life Cycle Assessment of Microbial 2,3-Butanediol Production from Brewer's

Spent Grain Modeled on Pinch Technology. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 11, 8271-8280. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.3c00616>

Wang, D., Oh, B., Lee, S., Kim, D., & Joe, M. (2021). Process optimization for mass production of 2,3butanediol by *Bacillus subtilis* CS13. *Biotechnology for Biofuels*, 15, 15. <https://doi.org/10.1186/s13068-020-01859-w>

Zang, G., Shah, A., & Wan, C. (2020). Techno-economic analysis of co-production of 2,3-butanediol, furfural, and technical lignin via biomass processing based on deep eutectic solvent pretreatment. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. <https://doi.org/10.1002/bbb.2081>